

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
26. September 2002 (26.09.2002)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 02/076158 A1**

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **H05H 1/34**, 1/30

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE02/00813

(22) Internationales Anmeldedatum:  
6. März 2002 (06.03.2002)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
101 12 494.5 15. März 2001 (15.03.2001) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme  
von US): **MTU AERO ENGINES GMBH** [DE/DE];  
Dachauer Strasse 665, 80995 München (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **BAYER, Erwin**  
[DE/DE]; Ostenstrasse 36, 85221 Dachau (DE). **BETZ,**  
**Philip** [DE/DE]; Ahornweg 14, 75433 Maulbronn  
(DE). **HÖSCHELE, Jörg** [DE/DE]; Lausbüchel 3,  
88074 Meckenbeuren-Brochenzell (DE). **ÖFFINGER,**  
**Friedrich** [DE/DE]; Alte Dorfstrasse 9, 70599 Stuttgart  
(DE). **STEINWANDEL, Jürgen** [DE/DE]; Bodanstrasse  
19a, 88690 Uhldingen-Mühlhofen (DE).

(74) Anwälte: **ZACHARIAS, Frank** usw.; DaimlerChrysler  
AG, Intellectual Property Management, IPM - C 106,  
70546 Stuttgart (DE).

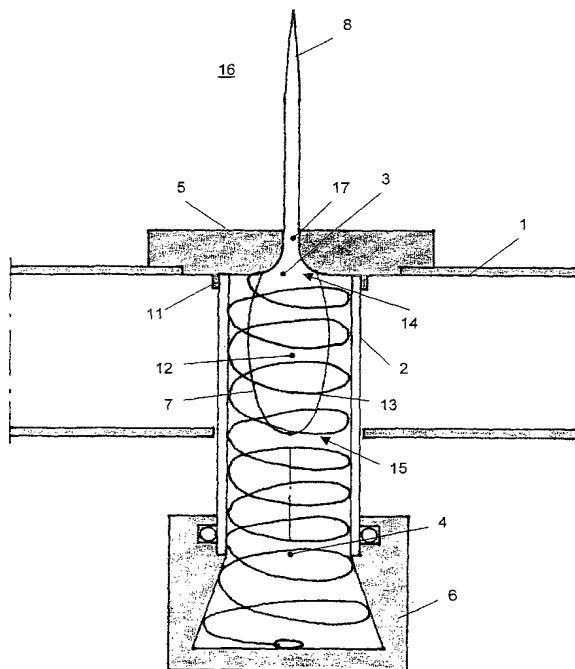
(81) Bestimmungsstaaten (national): CA, JP, US.

(84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT,  
BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC,  
NL, PT, SE, TR).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR PLASMA WELDING

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM PLASMASCHWEISSEN



(57) Abstract: The invention relates to a method for plasma welding by means of a free microwave induced plasma jet which is produced according to the following method: microwaves are produced in a high frequency microwave source; the microwaves are guided in a wave guide (1); process gas is introduced into a microwave transparent tube (2) which comprises a gas inlet (4) and a gas outlet (3) at a pressure  $p \leq 1$  bar, the process gas being introduced into the microwave transparent tube (2) via the gas inlet (4) so that it comprises a tangential flow component; a plasma (7) is produced in the microwave transparent tube (2) by igniting the process gases without electrodes; a jet of plasma (17) is produced by introducing the plasma into the work chamber (16) through a metallic expansion nozzle (5) arranged on the gas outlet (3) of the tube (2).

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Plasmaschweißen mittels eines freien mikrowelleninduzierten Plasmastrahls, der mittels folgender Verfahrensschritte erzeugt wird: Erzeugung von Mikrowellen in einer hochfrequenten Mikrowellenquelle, Führen der Mikrowellen in einem Hohlleiter (1), Einleiten eines Prozessgases in ein mikrowellentransparentes Rohr (2), welches eine Gaseintrittsöffnung (4) und eine Gasaustrittsöffnung (3) umfasst, bei einem Druck  $p \geq 1$  bar, wobei das Prozessgas durch die Gaseintrittsöffnung (4) derart in das mikrowellentransparente Rohr (2) eingeleitet wird, dass es

eine tangentiale Strömungskomponente aufweist, Erzeugung eines Plasmas (7) im mikrowellentransparenten Rohr (2) mittels elektrodenlosem Zünden des Prozessgases, Erzeugung eines Plasmastrahls (17) mittels Einleiten des Plasmas in den Arbeitsraum (16) durch eine an der Gasaustrittsöffnung (3) des Rohrs (2) angeordnete metallische Expansionsdüse (5).



WO 02/076158 A1



**Veröffentlicht:**

- mit internationalem Recherchenbericht
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.*

## **Verfahren zum Plasmaschweißen**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Plasmaschweißen nach Patentanspruch 1.

In den letzten Jahren sind vielfältige Anstrengungen unternommen worden gerade um die Leistungsfähigkeit konventioneller Plasmaschweißverfahren, z.B. Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG) oder Metallaktivgas-Schweißen (MAG) weiter zu steigern und weiterzuentwickeln.

Beim WIG-Schweißen brennt ein Lichtbogen zwischen einer nicht abschmelzenden Wolfram-Elektrode und dem Werkstück, wobei das Werkstück aufgeschmolzen wird. Der Lichtbogen hat einen Divergenzwinkel von etwa  $45^\circ$ . Das bedeutet, dass der Abstand zwischen WIG-Brenner und Werkstück die Leistungsdichte signifikant beeinflusst und diese insgesamt vergleichsweise gering ist. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit der Metalle fließt ein erheblicher Anteil der Wärme in die Umgebung der Schweißnaht ab. Bei einer durch die Lebensdauer der Elektrode begrenzten Stromstärke und damit auch begrenzten Lichtbogenleistung ergeben sich daraus relativ kleine Schweißgeschwindigkeiten.

Mittels wassergekühlter Expansionsdüsen kann der Plasmastrahl bei verschiedenen Plasmaschweißverfahren eingeschnürt werden, wodurch eine Verringerung der Lichtbogendivergenz auf ca.  $10^\circ$  (visuell) bewirkt werden kann. Damit wird bei den technisch üblichen Abständen zwischen Plasmabrenner und Werkstück eine höhere Leistungsdichte und daraus resultierend bei identischer Lichtbogenleistung eine höhere Schweißgeschwindigkeit erreicht. Durch den stabileren und gegenüber dem herkömmlichen WIG-Verfahren weniger divergenten Plasmastrahl ergibt sich darüber hinaus ein geringerer Einfluss der Schweißparameter auf die Lichtbogenform.

- 2 -

Führt man dem Lichtbogen bei geeigneter Elektrodenanordnung durch Erhöhung der Stromstärke deutlich mehr Energie zu, entsteht der sogenannte Stichlocheffekt. Bei entsprechender Dicke wird das Werkstück ösenförmig aufgeschmolzen und bei kontinuierlichem Vorschub des Plasmabrenners fließt das geschmolzene Metall um den Plasmastrahl herum und hinter ihm wieder zusammen.

Nachteilig wirkt sich bei den beschriebenen Verfahren aus, dass die mögliche Stromstärke durch die Lebensdauer der Elektroden begrenzt und damit die Schweißgeschwindigkeit limitiert ist. Dadurch kommt es zu einer hohen Wärmebelastung des Bauteils, breiten Wärmeeinflusszonen und darüber hinaus zu einem erheblichen Verzug des Werkstücks.

Die technischen Möglichkeiten, die Schweißgeschwindigkeit weiter zu steigern, sind im wesentlichen ausgeschöpft. Neben den daraus folgenden betriebswirtschaftlichen Konsequenzen wirkt sich das dahingehend aus, dass die gegenwärtig erreichten Grenzen für die Streckenenergie, den Verzug und die Eigenschaftsverschlechterung durch die relativ breite Wärmeeinflusszone zukünftig nicht wesentlich unterschritten werden können. Das ist dahingehend besonders nachteilig, als das Eigenschaftspotential moderner, hochfester Werkstoffe, deren Eigenschaften erst durch spezifische Wärmebehandlungen erreicht werden, durch den gegenwärtigen Entwicklungsstand der konventionellen Schweißverfahren bei weitem nicht genutzt werden kann.

Ein weiterer Nachteil der konventionellen Plasmaschweißverfahren besteht in der eingeschränkten Zugänglichkeit und Beobachtungsmöglichkeit der Schweißstelle aufgrund eines relativ großen Düsendurchmessers bei kleinem Werkstückabstand (ca. 5 mm).

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zum Plasmaschweißen anzugeben, bei dem die Nachteile des Standes der Technik vermieden werden.

- 3 -

Diese Aufgabe wird durch das Verfahren des Patentanspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Ausführungen der Erfindung sind Gegenstand von Unteransprüchen.

Erfindungsgemäß wird zum Plasmaschweißen ein freier mikrowelleninduzierter Plasmastrahl verwendet, der folgendermaßen erzeugt wird: in einer hochfrequenten Mikrowellenquelle werden Mikrowellen erzeugt, welche in einem Hohlleiter geführt werden. Das Prozessgas wird in ein mikrowellentransparentes Rohr, welches eine Gaseintrittsöffnung und eine Gasaustrittsöffnung umfasst, bei einem Druck  $p \geq 1$  bar derart durch die Gaseintrittsöffnung des Rohres eingeleitet, dass es eine tangentielle Strömungskomponente aufweist. Mittels elektrodenlosen Zündens des Prozessgases wird im mikrowellentransparenten Rohr ein Plasma erzeugt, welches durch eine an der Gasaustrittsöffnung des Rohrs angeordnete metallische Expansionsdüse in den Arbeitsraum eingeleitet wird, wodurch der Plasmastrahl erzeugt wird.

Mittels des erfindungsgemäßen elektrodenlosen Plasmaschweißverfahrens ergeben sich besonders vorteilhafte Plasmaeigenschaften. So wird die spezifische Enthalpie des Plasmas und die damit verbundene Enthalpieflussdichte des Plasmas erhöht. Damit verbunden wird die Plasmatemperatur des Plasmas und des Plasmastrahls erhöht. Daraus ergeben sich gegenüber den Schweißverfahren des Stands der Technik Vorteile hinsichtlich einer gesteigerten Schweißgeschwindigkeit und niedrigeren Schweißnahtkosten. Mit dem erfindungsgemäßen Plasmaschweißverfahren wird somit ein elektrodenloses Schweißverfahren angegeben, dass erhebliche betriebswirtschaftliche und anwendungsbezogene Vorteile bei gleichzeitig großer Einsatzbreite des Schweißverfahrens bietet.

Außerdem werden die Eigenschaften des Plasmastrahls hinsichtlich eines verringerten Durchmessers sowie einer verringerten Strahlwinkeldivergenz verbessert. Darüber hinaus breitet sich der zylindersymmetrische Plasmastrahl in dem erfindungsgemäßen Verfahren parallel aus, wodurch der Einfluss der Abstandsänderung zwischen Brenner und Werkstück auf die Einbrandform des

- 4 -

Plasmastrahls in das Werkstück verringert wird. Ein weiterer Vorteil ist, dass dadurch die Zugänglichkeit zum Plasmastrahl – hervorgerufen durch einen größer möglichen Abstand zwischen Brenner und Werkstück – verbessert wird. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren sind somit Abstände zwischen Brenner und Werkstück von 30 mm bis zu 100 mm möglich, bei einem Plasmastrahldurchmesser von 1 mm bis zu 3 mm auf dem Werkstück. Mit dem erfindungsgemäßen Plasmaschweißverfahren können so Leistungsdichten oberhalb von  $1,5 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$  erzeugt werden.

Die tangentielle Einspeisung des Prozessgases in das mikrowellentransparente Rohr unterstützt die erfindungsgemäße Erzeugung eines Plasmastrahls mit geringer Strahlwinkeldivergenz. Aufgrund der, durch die tangentielle Einspeisung des Prozessgases verursachte Radialbeschleunigung, die durch die Querschnittsverengung der Expansionsdüse in Richtung des Düsenaustritts weiter verstärkt wird, bewegen sich die ungleichförmig beschleunigten freien Ladungsträger in Richtung des Expansionsdüsenaustritts auf immer engeren Spiralbahnen, wodurch die Zentripetalbeschleunigung der Ladungsträger zunimmt. Diese Bewegung wird von den Ladungsträgern auch nach Austritt aus der Expansionsdüse in den Arbeitsraum beibehalten. Da aufgrund der unterschiedlichen Ionen- und Elektronenbeweglichkeit lokal keine Ladungsneutralität vorliegt, wird im Plasmastrahl ein axial orientiertes Magnetfeld induziert, welches zu einer Strömungseinschnürung des Plasmastrahl nach Austritt aus der Düse führt (z-Pinch). Es handelt sich hierbei um den Magneto-Hydrodynamischen Effekt (MHD-Effekt).

Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens ist, dass der Plasmastrahl mittels kostengünstiger und robuster Hochfrequenzsysteme, z.B. Magnetron oder Klystron erzeugt werden kann. Mit diesen Hochfrequenzsystemen sind vorteilhaft Mikrowellenquellen im erforderlichen Leistungsbereich bis 100 kW und Frequenzbereich von 0,95 GHz bis 35 GHz zugänglich. Insbesondere können Mikrowellen der Frequenz 2,46 GHz verwendet werden, da es sich

- 5 -

hierbei um kostengünstige und in der Industrie und Haushaltsanwendungen weit verbreitete Mikrowellenquellen handelt.

In dem erfindungsgemäßen Plasmaschweißverfahren ist außerdem die Energieeffizienz gegenüber konventionellen Plasmaschweißverfahren gesteigert. So ist es möglich, mikrowelleninduzierte Plasmen zu erzeugen, bei denen die Leistungseinkopplung aus dem Strahlungsfeld der Mikrowellenquellen größer als 90% ist. Somit ergeben sich gegenüber Schweißverfahren mit Hochleistungsdioden eine um das 1,5-fache und gegenüber Laserschweißverfahren eine um das 20-fache gesteigerte Energieeffizienz.

Die zur Plasmaerzeugung nötige Einkopplung der Hochfrequenzenergie der Mikrowellenquelle in die relevanten Prozessgase hängt dabei von den elektromagnetischen Stoffkonstanten der relevanten Prozessgase, insbesondere von der komplexen Dielektrizitätskonstante (DK)  $\varepsilon$  ab:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (1)$$

Die komplexe DK ist eine nichtlineare Funktion der Temperatur sowie eine lineare Funktion der Frequenz. Das Verhältnis zwischen Imaginärteil und Realteil der komplexen DK wird als dielektrischer Verlustwinkel  $\varphi$  bezeichnet und definiert eine Absorptionswahrscheinlichkeit des Prozessmediums für Hochfrequenzenergie:

$$\tan \varphi = \varepsilon'' / \varepsilon' \quad (2)$$

Die volumenspezifische Absorption von Hochfrequenzenergie durch ein grundsätzlich hochfrequenzabsorbierendes Medium (im vorliegenden Fall ein geeignetes Prozessgas) ist wie folgt gegeben:

$$P_{\text{abs}} = \pi \nu \varepsilon'' |E|^2 \quad (3)$$

- 6 -

$\nu$  ist die Frequenz der absorbierten Hochfrequenzstrahlung mit der elektrischen Feldstärke  $E$  im absorbierenden Volumen. Sofern die Absorptionsverluste der Hochfrequenzstrahlung im absorbierenden Volumen vorwiegend über die (frequenzabhängige) elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  in  $(\Omega m)^{-1}$  definiert werden können, wobei magnetische Effekte vernachlässigbar sind, gilt:

$$\varepsilon'' = \sigma / 2 \pi \nu \quad (4)$$

Damit ergibt sich für die insgesamt in einem elektrisch absorbierenden Medium umsetzbare Verlustleistungsdichte für einlaufende Hochfrequenzstrahlung:

$$P_{abs} = \frac{1}{2} \sigma |E|^2 \quad (5)$$

Bei der Plasmaerzeugung durch Hochfrequenzstrahlung in Gasen ist zwischen dem Vorgang der Zündung - geringe elektrische Leitfähigkeit - sowie dem Vorgang der Aufrechterhaltung eines Plasmas - elektrische Leitfähigkeit typischer Plasmagase um mindestens 3 Zehnerpotenzen höher als diejenige der entsprechenden nichtionisierten Gase - zu unterscheiden. Generell hilfreich, sowohl bei der Plasmazündung als auch beim Betrieb des Plasmas ist, infolge der Abhängigkeit der umsetzbaren Verlustleistungsdichte vom Absolutquadrat der lokalen elektrischen Feldstärke  $E$ , eine hohe lokale elektrische Feldstärke  $E$ .

Aufgrund der elektrodenlosen Plasmaerzeugung ist bei dem erfindungsgemäßen Verfahren keine Einschränkung hinsichtlich der einsetzbaren Prozessgase vorhanden. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren wird somit das Problem des Standes der Technik gelöst, dass bei elektrodeninduzierten Plasmen es zu Reaktionen der eingesetzten Prozessgase mit den Elektrodenwerkstoffen kommt, z.B. zur Bildung von Wolframoxid oder Wolframnitrid bei Wolframelektroden oder zur Wasserstoffversprödung. Es ist somit möglich, dass durch geeignete Wahl prozesstauglicher Gase oder Gasgemischungen die spezifische Enthalpie des Plasmas in Verbindung mit einer verbesserten Wärmeleitung zwischen Plasma und Werkstück zu vergrößern. In einer vorteilhaften Ausführung der



- 7 -

Erfindung ist es möglich, dass dem Prozessgas vor Eintritt in das mikrowellentransparente Rohr Pulver zugeführt wird. Dadurch ist es z.B. möglich, das erfindungsgemäße Verfahren als Pulverauftragsschweißverfahren einzusetzen. Es ist selbstverständlich auch möglich, dem Plasmastrahl nach Austritt aus der Expansionsdüse das Pulver zuzuführen.

Außerdem wird, aufgrund des elektrodenlosen Plasmaschweißens der Eintrag von unerwünschtem Elektrodenmaterial in das Schweißgut verhindert. Des weiteren ist ein störungsfreier, mannloser und automatisierter Schweißprozess ohne ständiges Auswechseln von Verschleißteilen möglich.

Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Plasmaschweißverfahrens ist, dass die Wärmeeinflusszone des Plasmastrahls auf dem Werkstück wesentlich reduziert wird, was einen geringeren Wärmeeintrag, einen reduzierten Werkstückverzug und eine Verringerung der Werkstoffschädigung zur Folge hat. Außerdem wird mittels des erfindungsgemäßen Plasmaschweißverfahrens ein fehlerarmes Schweißen hinsichtlich geringerer Randkerben und geringer Porosität der Schweißnaht ermöglicht.

In einer vorteilhaften Ausführung der Erfindung wird das Prozessgas durch eine Düse derart in das mikrowellentransparente Rohr eingeleitet, dass das in das Rohr einströmende Prozessgas eine tangential und eine in Richtung der Gasaustrittsöffnung des Rohrs gerichtete axiale Strömungskomponente aufweist.

In einer weiteren vorteilhaften Ausführung der Erfindung weist die metallische Expansionsdüse, in Strömungsrichtung des Plasmas gesehen, plasmaseitig einen konvergenten Einlauf und plasmastrahlseitig einen freien oder divergenten Auslauf auf. Dadurch ist es möglich, die Eigenschaften des Plasmastrahls hinsichtlich einer Verringerung der Strahlwinkeldivergenz zu verbessern. Außerdem kann mittels des Öffnungsquerschnitts der Expansionsdüse der Strahldurchmesser limitiert werden. Aufgrund der hohen Plasmatemperaturen kann

die metallische Expansionsdüse in einer vorteilhaften Ausführung der Erfindung gekühlt werden.

Um einen sicheren Betrieb, sowie eine sichere Zündung der für das erfindungsgemäße Verfahren benötigten Plasmen zu gewährleisten, wird in einer vorteilhaften Ausführung der Erfindung der für die Führung der Mikrowellen vorhandene Hohlleiter im Querschnitt verengt. Dabei wird der Hohlleiter bevorzugt an der Stelle verengt, an der das mikrowellentransparente Rohr durch den Hohlleiter geführt wird. Der Hohlleiter und das Rohr sind dabei in einer zweckmäßigen Ausführung der Erfindung senkrecht zueinander ausgerichtet. Der Vorteil ist eine Erhöhung der elektrischen Feldstärke am Ort der Querschnittsverengung. Dadurch werden zum einen die Zündeigenschaften des Prozessgases verbessert und zum anderen die Leistungsdichte des Plasmas erhöht.

In einer weiteren vorteilhaften Ausführung der Erfindung ist es auch möglich, dass zur Zündung des Plasmas eine Funkenstrecke eingesetzt wird.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand von Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

- Fig. 1 die mittels statistischer Thermodynamik berechnete temperaturabhängige Enthalpie eines Stickstoffplasmas,
- Fig. 2 eine Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens in Schnittdarstellung mit Hohlleiter, Expansionsdüse, mikrowellentransparenten Rohr und einer Zuführungseinheit für das Prozessgas,
- Fig. 3 eine beispielhafte Expansionsdüse in Schnittdarstellung,
- Fig. 4 eine Zuführungseinheit für das Prozessgas in Draufsicht.

Mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens werden insbesondere mikrowelleninduzierte thermische Plasmen erzeugt. Diese Plasmen zeichnen sich durch ein lokales thermodynamisches Gleichgewicht (LTG) der verschiedenen Enthalpie

beiträge des Plasmas aus. Die Gesamtenthalpie des Plasmas bestimmt sich dabei in Abhängigkeit der molekularen Natur der Prozessgase durch folgende Beiträge:

- Enthalpie aus den Freiheitsgraden für Translation, Rotation und Vibration,
- Enthalpie aus Dissoziation,
- Enthalpie aus Ionisation.

Mittels der statistischen Thermodynamik ist die temperaturabhängige Gesamtenthalpie  $H(T)$  und die daraus in erster Ableitung nach der Temperatur bestimmbare temperaturabhängige Wärmekapazität  $C_p(T)$  berechenbar. Dabei sind in den Zustandssummen für die Translation, Rotation und Vibration die jeweiligen molekularen Freiheitsgrade zu berücksichtigen. Die entsprechenden Zustandssummen lassen sich dabei beim Vorhandensein von Dissoziation sowie Ionisation aus den jeweiligen Gleichgewichtskonstanten berechnen (nicht näher ausgeführt).

In Fig. 1 ist die berechnete temperaturabhängige Enthalpie eines Stickstoffplasmas, welches mittels der erfindungsgemäßen Verfahrensschritte erzeugt wurde, dargestellt. Das Diagramm zeigt bis zu einer Temperatur von 20000 K einen sehr steilen Anstieg (logarithmische Darstellung der Ordinate) der Enthalpie.

Fig. 2 zeigt in Schnittdarstellung eine Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens. Die Darstellung zeigt ein mikrowellentransparentes Rohr 2, welches senkrecht durch einen Hohlleiter 1 geführt ist, der die von einer nicht dargestellten Mikrowellenquelle erzeugten Mikrowellen transportiert. Das mikrowellentransparente Rohr 2 wird durch eine an der Oberseite des Hohlleiters 1 befindliche Öffnung 14 und eine an der Unterseite des Hohlleiters 1 befindliche Öffnung 15 geführt.

Das mikrowellentransparente Rohr 2 weist eine Gaseintrittsöffnung 4 für das Prozessgas und eine Gasaustrittsöffnung 3 für das Plasma 7 auf. Im Bereich

- 10 -

12, in dem das mikrowellentransparente Rohr 2 durch den Hohlleiter 1 verläuft wird, das Plasma 7 durch Mikrowellenabsorption erzeugt.

Eine Gaszuführungseinheit 6 ist an der Gaseintrittsöffnung 4 an dem mikrowellentransparenten Rohr 2 befestigt, z.B. mittels einer Quetschverbindung um eine Zerstörung des mikrowellentransparenten Rohrs zu vermeiden. In dieser Gaszuführungseinheit 6 sind Düsen (nicht eingezeichnet) vorhanden, durch die das Prozessgas in das mikrowellentransparente Rohr 2 eingespeist wird. Die Düsen sind dabei derart angeordnet, dass das einströmende Prozessgas eine tangentielle und eine in Richtung der Gasaustrittsöffnung 3 gerichtete axiale Strömungskomponente aufweist. Insbesondere wird das Prozessgas innerhalb des mikrowellentransparenten Rohrs auf spiralförmigen Bahnen geführt. Dadurch kommt es zu einer starken Zentripetalbeschleunigung des Gases in Richtung der Innenoberfläche des mikrowellentransparenten Rohrs 2 und zur Ausbildung eines Unterdrucks auf der Rohrachse. Dieser Unterdruck erleichtert außerdem auch die Zündung des Plasmas.

Das Plasma kann mittels einer nicht eingezeichneten Funkenstrecke, z.B. eine Bogenentladung oder ein Zündfunke gezündet werden. Bei optimaler Abstimmung des Hohlleitersystems, d.h. maximale Feldstärke der Mikrowelle am Ort der Rohrachse ist auch eine selbstständige Plasmazündung möglich.

An der Gasaustrittsöffnung 3 des mikrowellentransparenten Rohrs 2 ist eine metallische Expansionsdüse 5 befestigt. Die Expansionsdüse 5 ist dabei derart angeordnet, dass die Öffnung 14 des Hohlleiters 1 abgeschlossen wird. Zur Fixierung des mikrowellentransparenten Rohrs 2 ist in die Unterseite der Expansionsdüse 5 eine Nut oder ein Steg 11 eingearbeitet. Der Steg 11 ragt dabei nur wenige Millimeter in den Hohlleiterraum hinein, wodurch verhindert wird, dass es zu einer Störung des Mikrowellenfeldes innerhalb des Hohlleiters 1 kommt.

- 11 -

Die Expansionsdüse 5 weist an ihrer Unterseite, also an der dem Plasma 7 zugewandten Seite einen konvergenten Einlauf auf. Durch diese Verengung werden die Ladungsträger im Plasma 7 bis hin zur Austrittsöffnung 17 weiter beschleunigt. Das Plasma 7 tritt dann als Plasmastrahl 8 durch die Austrittsöffnung 17 in den Arbeitsraum 16 ein. Der Auslauf der Expansionsdüse 5 ist in der vorliegenden Darstellung als freier Auslauf dargestellt. Es ist aber auch ein divergenter Auslauf möglich.

Die Zentripetalbeschleunigung der Ladungsträger im Plasma 7 setzt sich nach Austritt durch die Expansionsdüse 5 im freien Plasmastrahl 8 fort. Aufgrund der Zentripetalbeschleunigung der Ladungsträger im Plasmastrahl 8 wird, wie in der Beschreibungseinleitung beschrieben, im Plasmastrahl 8 ein axiales Magnetfeld induziert, wodurch sich die Einschnürung der Strömung auch über die Austrittsöffnung 17 der Expansionsdüse 5 hinweg fortsetzt. Somit wird ein Plasmastrahl 8 mit einer geringen Strahlwinkeldivergenz erzeugt.

Fig. 3 zeigt eine beispielhafte Expansionsdüse in Schnittdarstellung. An der Unterfläche der Expansionsdüse 5 ist ein Steg 11 zur Fixierung des mikrowellentransparenten Rohrs (nicht eingezeichnet) eingearbeitet. Der Steg 11 ist insbesondere kreisförmig ausgebildet und weist einen Innenradius auf, der dem Außenradius des mikrowellentransparenten Rohrs entspricht.

Der Einlaufbereich 9 der Expansionsdüse 5 ist konvergent ausgestaltet, was zu einem Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit der Ladungsträger des Plasmas bis hin zur Austrittsöffnung 17 führt. Der Auslaufbereich 10 der Expansionsdüse 5 ist divergent ausgeführt.

Es ist möglich, bei geeigneten Druckverhältnissen zwischen dem Druck im Arbeitsraum 16 und dem Druck im Innern 12 des mikrowellentransparenten Rohrs, bei geeigneter Größe der Austrittsöffnung 17 sowie bei einer geeigneten Ausgestaltung des Einlaufbereichs 9 und des Auslaufbereichs 10 der Expansi

onsdüse 5 einen Plasmastrahl (nicht dargestellt) zu erhalten, der mit Überschall in den Arbeitsraum 16 expandiert.

In Fig. 4 ist in Draufsicht eine Gaszuführungseinheit zur Zuführung des Prozessgases in das mikrowellentransparente Rohr 2 dargestellt. In der Gaszuführungseinheit 6 sind zwei Düsen 18 ausgeführt, die das Prozessgas in zwei sich gegenüberliegende Richtungen in das mikrowellentransparente Rohr 2 einspeisen. Dadurch wird eine tangentielle Einspeisung des Prozessgases erreicht.

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Plasmaschweißen mittels eines freien mikrowelleninduzierten Plasmastrahls, der mittels folgender Verfahrensschritte erzeugt wird
  - Erzeugung von Mikrowellen in einer hochfrequenten Mikrowellenquelle,
  - Führen der Mikrowellen in einem Hohlleiter (1),
  - Einleiten eines Prozessgases in ein mikrowellentransparentes Rohr (2), welches eine Gaseintrittsöffnung (4) und eine Gasaustrittsöffnung (3) umfasst, bei einem Druck  $p \geq 1$  bar, wobei das Prozessgas durch die Gaseintrittsöffnung (4) derart in das mikrowellentransparente Rohr (2) eingeleitet wird, dass es eine tangentialen Strömungskomponente aufweist,
  - Erzeugung eines Plasmas (7) im mikrowellentransparenten Rohr (2) mittels elektrodenlosem Zünden des Prozessgases,
  - Erzeugung eines Plasmastrahls (17) mittels Einleiten des Plasmas (7) in den Arbeitsraum (16) durch eine an der Gasaustrittsöffnung (3) des Rohrs (2) angeordnete metallische Expansionsdüse (5).
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Prozessgas mittels einer Düse (18) derart in das Rohr (2) eingeleitet wird, dass das in das Rohr (2) einströmende Prozessgas eine tangentialen und eine in Richtung der Gasaustrittsöffnung (3) gerichtete axiale Strömungskomponente aufweist.
3. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die metallische Expansionsdüse (5), in Strömungsrichtung des Plasmas gesehen, plasmaseitig einen konvergenten Einlauf (9) und plasmastrahlseitig einen freien oder divergenten Auslauf (10) aufweist.

- 14 -

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die metallische Expansionsdüse (5) gekühlt wird.
5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Plasmaerzeugung Mikrowellen im Frequenzbereich zwischen 0,95 GHz und 35 GHz eingesetzt werden.
6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der senkrecht zum mikrowellentransparenten Rohr (2) ausgerichtete Hohlleiter (1) an der Stelle, an der das Rohr (2) durch den Hohlleiter (1) geführt ist, im Querschnitt verengt ist.
7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als mikrowellentransparentes Rohr (2) ein Rohr mit dielektrischen Eigenschaften aus  $\text{SiO}_2$  oder  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in reiner Form ohne Dotierungen eingesetzt wird.
8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Zündung des Plasmas eine Funkenstrecke eingesetzt wird.
9. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass dem Prozessgas vor Eintritt in das mikrowellentransparente Rohr (2) Pulver zugeführt wird.



1/3

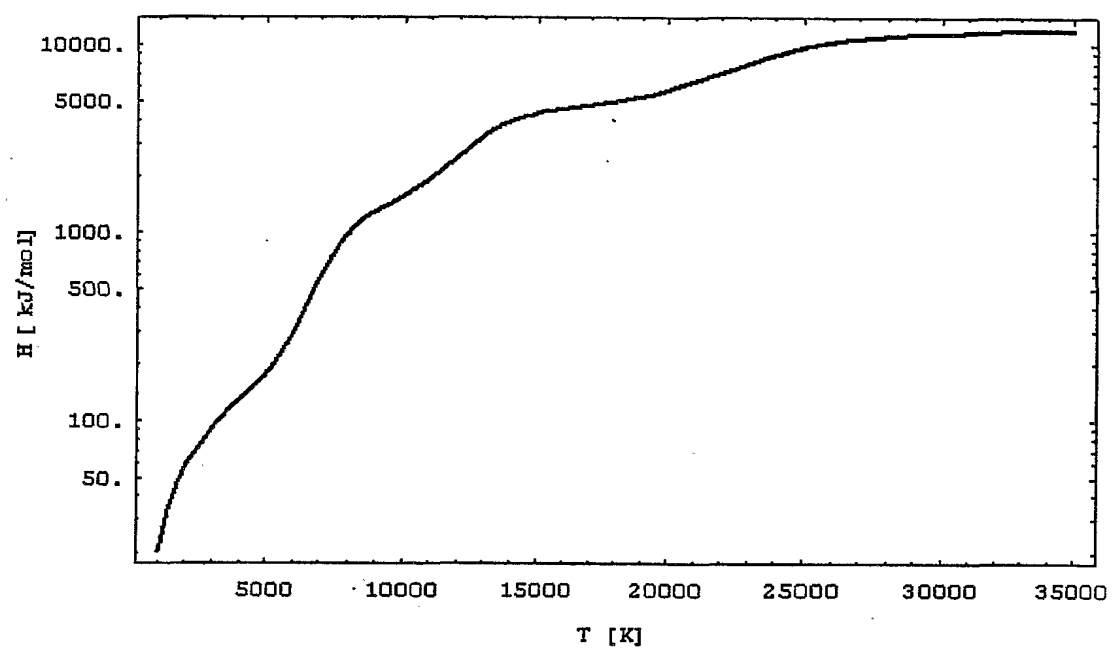


Fig. 1

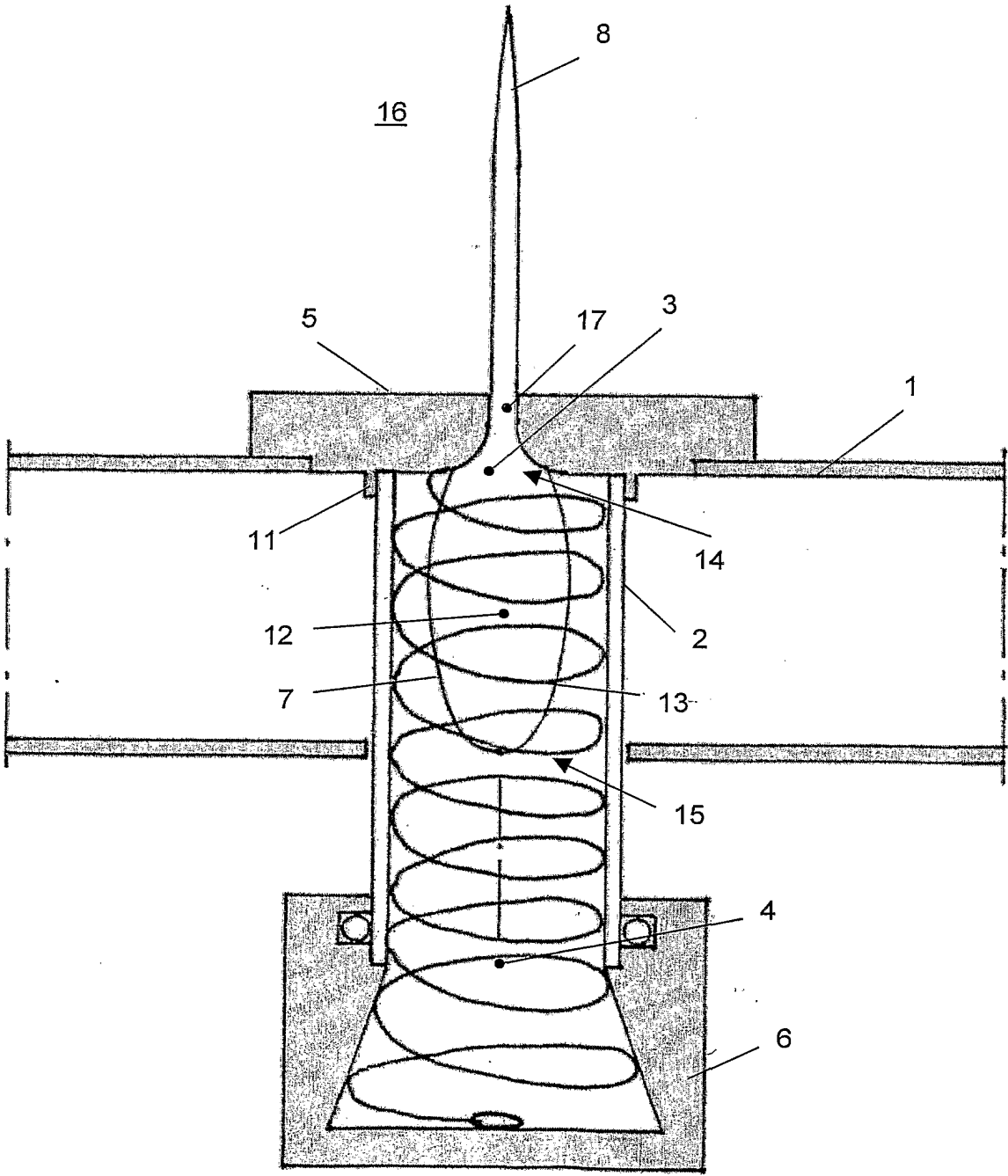


Fig. 2

3/3

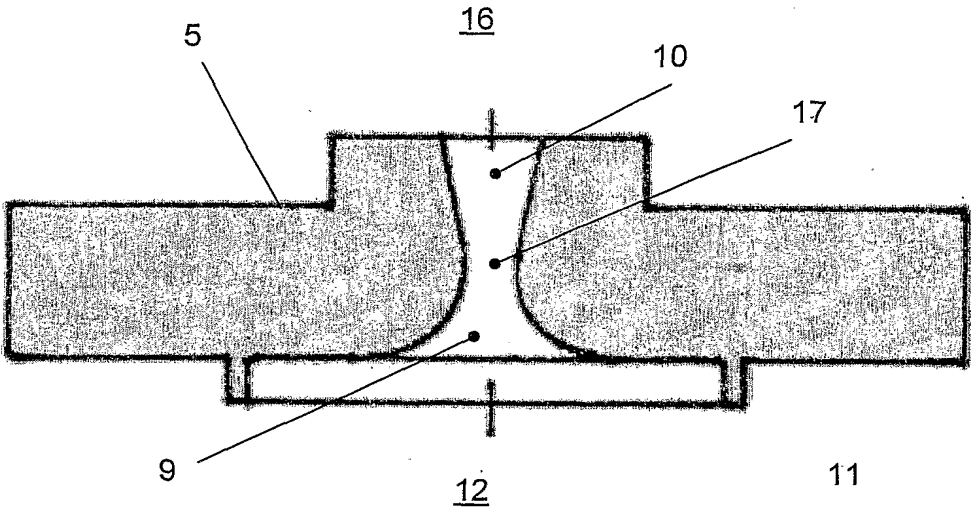


Fig. 3

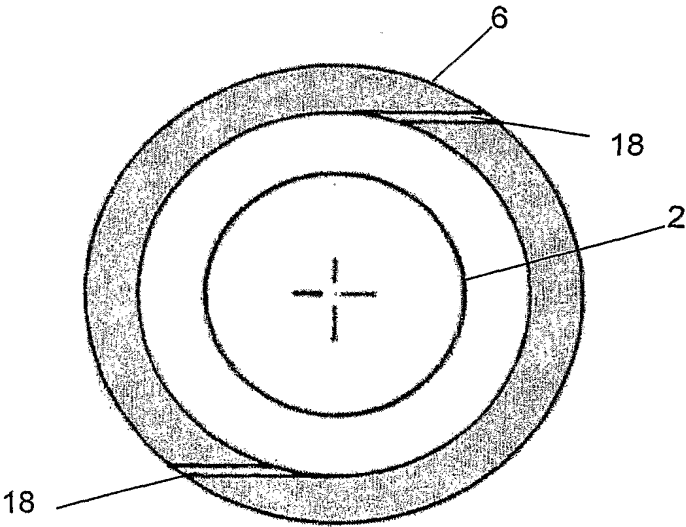


Fig. 4

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/DE 02/00813

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
 IPC 7 H05H1/34 H05H1/30

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 H05H B23K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5 349 154 A (HARKER ALAN B ET AL) 20 September 1994 (1994-09-20) column 2, line 56 -column 3, line 59 figure 1 ---	1,2,5-7
A	US 5 973 289 A (MICCI MICHAEL M ET AL) 26 October 1999 (1999-10-26) column 5, line 48 - line 60 column 6, line 65 -column 7, line 10 figures 2,6 ---	3
A	US 5 414 235 A (LUCAS WILLIAM ET AL) 9 May 1995 (1995-05-09) column 1, line 63 - line 65 column 2, line 62 -column 5, line 36 figure 3 --- -/--	1,5-8

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

° Special categories of cited documents :

\*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

\*E\* earlier document but published on or after the international filing date

\*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

\*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

\*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

\*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

\*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

\*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

\* & \* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

28 August 2002

Date of mailing of the international search report

05/09/2002

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
 NL - 2280 HV Rijswijk  
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Capostagno, E

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/DE 02/00813

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	FR 2 547 693 A (AIR LIQUIDE) 21 December 1984 (1984-12-21) the whole document -----	1,3,5-7

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/DE 02/00813

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5349154	A	20-09-1994	NONE	
US 5973289	A	26-10-1999	US 5793013 A BR 9608565 A CA 2221624 A1 EP 0829184 A1 JP 11506805 T WO 9641505 A1	11-08-1998 30-11-1999 19-12-1996 18-03-1998 15-06-1999 19-12-1996
US 5414235	A	09-05-1995	EP 0559715 A1 WO 9210077 A1 JP 6502959 T	15-09-1993 11-06-1992 31-03-1994
FR 2547693	A	21-12-1984	FR 2547693 A1	21-12-1984

## INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE 02/00813

## A. KLASIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

IPK 7 H05H1/34 H05H1/30

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

## B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

IPK 7 H05H B23K

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

## C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 5 349 154 A (HARKER ALAN B ET AL) 20. September 1994 (1994-09-20) Spalte 2, Zeile 56 - Spalte 3, Zeile 59 Abbildung 1 ---	1,2,5-7
A	US 5 973 289 A (MICCI MICHAEL M ET AL) 26. Oktober 1999 (1999-10-26) Spalte 5, Zeile 48 - Zeile 60 Spalte 6, Zeile 65 - Spalte 7, Zeile 10 Abbildungen 2,6 ---	3
A	US 5 414 235 A (LUCAS WILLIAM ET AL) 9. Mai 1995 (1995-05-09) Spalte 1, Zeile 63 - Zeile 65 Spalte 2, Zeile 62 - Spalte 5, Zeile 36 Abbildung 3 --- -/--	1,5-8



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

\*A\* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

\*E\* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

\*L\* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

\*O\* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

\*P\* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

\*T\* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

\*X\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

\*Y\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

\*&amp; Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

28. August 2002

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

05/09/2002

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Capostagno, E

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE 02/00813

## C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	FR 2 547 693 A (AIR LIQUIDE) 21. Dezember 1984 (1984-12-21) das ganze Dokument -----	1,3,5-7



# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

In. .... nales Aktenzeichen

PCT/DE 02/00813

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
US 5349154	A	20-09-1994	KEINE		
US 5973289	A	26-10-1999	US	5793013 A	11-08-1998
			BR	9608565 A	30-11-1999
			CA	2221624 A1	19-12-1996
			EP	0829184 A1	18-03-1998
			JP	11506805 T	15-06-1999
			WO	9641505 A1	19-12-1996
US 5414235	A	09-05-1995	EP	0559715 A1	15-09-1993
			WO	9210077 A1	11-06-1992
			JP	6502959 T	31-03-1994
FR 2547693	A	21-12-1984	FR	2547693 A1	21-12-1984

**PUB-NO:** WO002076158A1  
**DOCUMENT-IDENTIFIER:** WO 2076158 A1  
**TITLE:** METHOD FOR PLASMA WELDING  
**PUBN-DATE:** September 26, 2002

**INVENTOR-INFORMATION:**

<b>NAME</b>	<b>COUNTRY</b>
BAYER, ERWIN	DE
BETZ, PHILIP	DE
HOESCHELE, JOERG	DE
OEFFINGER, FRIEDRICH	DE
STEINWANDEL, JUERGEN	DE

**ASSIGNEE-INFORMATION:**

<b>NAME</b>	<b>COUNTRY</b>
MTU AERO ENGINES GMBH	DE
BAYER ERWIN	DE
BETZ PHILIP	DE
HOESCHELE JOERG	DE
OEFFINGER FRIEDRICH	DE
STEINWANDEL JUERGEN	DE

**APPL-NO:** DE00200813  
**APPL-DATE:** March 6, 2002

**PRIORITY-DATA:** DE10112494A (March 15, 2001)

**INT-CL (IPC):** H05H001/34 , H05H001/30

**EUR-CL (EPC) :** H05H001/30

**ABSTRACT:**

CHG DATE=20021101 STATUS=O>The invention relates to a method for plasma welding by means of a free microwave induced plasma jet which is produced according to the following method: microwaves are produced in a high frequency microwave source; the microwaves are guided in a wave guide (1); process gas is introduced into a microwave transparent tube (2) which comprises a gas inlet (4) and a gas outlet (3) at a pressure p